

物理的な状態変化をエネルギーにより追究する学習 (1)

駒野 庄平¹ 羽入 敏夫²

野本 憲雄³ 後藤 正邦⁴

I はじめに

自然界に起こるいろいろな現象をエネルギーで追究する学習の重要性が強調され、その指導法の変革開発に手がつけられたのは高等学校物理においてであった。この変革のきっかけは、「仕事」の学問的な意味を学習の場に明確に打ち出したPSSC¹⁾の出現であり、また、熱および仕事とエネルギーの相異を指摘された富山小太郎先生の論文²⁾であった。しかし、このような変革の気運は、日本では高等学校物理に定着する前に、ナフィールドの一連の実験³⁾をきっかけに、中学校の理科に及んだ。とくに、今度改訂された中学校学習指導要領では、エネルギーに関する学習は定量的な実験を行なうことになっている。

ところで、高等学校においては、中学校におけるそうした学習を引き継ぎ、いかにして発展させていくかという実践的な研究が遅れている。そこで、筆者らは、高等学校物理におけるエネルギーに関する学習指導法の実践的研究が急務であると考えた。

この研究は次の2面から進められている。

○基本的な科学概念としてのエネルギーの検討

○生徒の実態に合った学習指導計画の検討

前者については、「エネルギーは状態量であり、状態が変化したときにのみ測定可能な量である。そして、そのものさしが仕事である。」という認識から出発している。後者については、エネルギー概念のような高度な概念の育成には、生徒の発見にのみ待つ学習は望めないと考えられるため、なぜこのような見方・考え方をするかという必然性を重視した、いわゆる「プログラム化された発見的学習」を基調とした。

われわれの指導計画の基本構想は、エネルギーという量なしでは手がかりが求められない現象、とくに、ミクロな世界を追究する学習まで含めているが、この報告では、導入としての力学的エネルギーの指導に限ってある。

II 指導に当たっての基本的な考え方

エネルギー概念が、現代科学にとって、最も重要な基本的科学概念であることはいうまでもないが、高等学校物理でエネルギー的な見方・考え方を指導するに当たり、われわれはエネルギーをどうとらえたかを、まず、明らかにしておく。

1. 新潟県立教育センター 2. 新潟県立三条工業高等学校 3. 新潟県立直江津高等学校
4. 新潟県立村松高等学校

1 エネルギー保存則の重要性

自然界に起こる現象を理解するためには、いうまでもなく、その手がかりとして運動の法則が必要となってくる。その具体的な形の一つがニュートンの運動方程式であろう。この法則によれば、物体に働く力がわかれば、原理的には物体の運動状態をきめることができるわけであるが、現実には不可能なことが多い。それは、現象の素過程で実際に働いている力が実験的にあるいは理論的にわからないことが多いためである。

このような困難を解決するために生まれてきたのが、現象の素過程に立ち入らずに、その前後の不変量に注目する一連の保存則であって、エネルギー保存則もそれらの中の一つにほかならず、特に重要な位置を占めているものと考えた。それは、

- (1) 系の状態をきめる変数の関数として、エネルギーの形が与えられると、その系の性質はそれによって、ほとんどきまってしまう。⁴⁾
- (2) ニュートンの運動法則では解決が不可能な現象でも解決してくれることが多い。
- (3) 速度などの古典的概念が意味を失ってしまうミクロな世界においても妥当性をもつ。

といった事項である。

けれども、エネルギーは、力などと異なり、自然界に起こる現象を理解するために意識的に作られた概念であることに注意したい。それは、数学的な概念で、たいへん抽象的な考え方であり、素過程などの具体的なことから記述ではないが、しかし、今日知られている限り最も普遍的概念で、自然界のあらゆる階層を貫いて成立している法則であるという意味で重要であると考えた。つまり、ポアンカレのいうように「エネルギーというものがあって、それが保存するかどうかという問題なのではなく、自然界に何が恒常のままにとどまっている何かがある」⁵⁾というとらえ方である。

このような観点に立てば、エネルギーの指導は、力のような微分量はわかりにくい、エネルギーのような積分量はわかりやすいからとか、⁶⁾ベクトル量よりスカラー量がわかりやすいからという立場ではなく、より普遍的で発展性のある見方・考え方を会得させるという積極的な立場に立って重要であると考えた。

2 状態量(エネルギー)とtransientな量(仕事)

エネルギーの概念は高度の抽象的なものと考えられる反面、今日では実際にはエネルギーということばが日常生活においてなじみの深いものになっている。そのため、エネルギーというものが実在して、それが、いろいろと姿を変えて仕事や熱になったりするというように考えられていることがよくある。このことは、熱はエネルギーの一形態であるというように表現されることが多いが、まちがいでである²⁾と考える。

エネルギーは状態だけで定まる状態量であるのに対して、仕事は初めの状態と変化した後の状態が定まったときのみ意味をもつ量であり、さらに、熱はその変化の過程まで定まったときに意味をもつ量である。つまり、仕事や熱は状態変化にともなって、エネルギーの移動が起こる際にのみ姿を現わす、

いわば, transient な量であるということができよう。⁷⁾このように考えてくると, "熱エネルギー" ということばは, 学問的にも教育的にも適切なことばではないように思われる。(しかし, われわれは, 中学校の学習を引き継ぐという立場から, 導入時には "内部エネルギー" は使用しない。¹⁰⁾)

ところで, エネルギーは状態量であるから, たとえば, "質量 500 Kg の自動車が, 60 Km/h で走っているときにもっているエネルギー" などというものは測定できるものではない。測定できるのは, それが速度を変えたときに, 他へ移動するエネルギーの変化量のみである。そして, このエネルギーの移動量の大きさをはかるものさしが仕事の大きさにほかならない。そこで, この事実をエネルギー概念育成の指導における第1のベースとした。

したがって, エネルギー概念の導入に当たっては, 旧来のように, ややもすると天下りのに仕事を定義し, それから力学的エネルギーやその保存則へと発展するやり方をとらずに, PSSC, ナフィールド等にみられるように, 最初からエネルギー保存の考えを底流にして, 仕事を実験をとおして必然的に導入し, また, 実験で検証しながら力学的エネルギーの考えに発展させていく方針を採用した。

エネルギーを導入する際に, PSSC のいう次の一文は傾聴に値する。¹⁾

It will be wise not to try to define energy in terms of work. However, this is the time for an exact definition of work, since work is a purely mechanical concept.

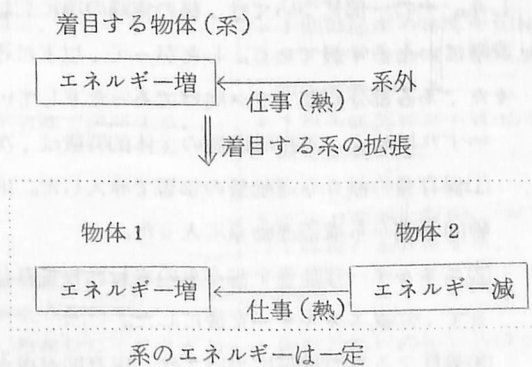
3 エネルギー保存則と系の拡張

前述のようにわれわれが考えたのは, その底流に「エネルギー保存則が一種の経験法則であって, そのことは, 学習を進めていく上でも最も重視しなければならないであろう」という Philosophy があるからに他ならない。したがって, エネルギー保存則の指導は, その適用方法とか, それを使って問題を解くといった面だけでなく, エネルギー保存則を導出する過程に重点を置いた。つまり, 旧来の指導方法では, ややもすると飛躍的に系を拡張してしまうきらいがあったが, われわれは, 着目する物体(系)が外部(系外)と相互作用する場合, まず, その物体のエネルギーが変化したことを確認し, あらためて, 外部の物体のエネルギー変化を考察し, 外部

のどこまでを着目する系と考えれば, エネルギー保存則が成立するかを考える指導の流れを考えた。

たとえば, 摩擦のない面の上を運動している物体が, 他の物体と相互作用をしていない場合にはその物体のみに着目して, 力学的エネルギー保存則が成り立っていることをまず確認する。次に, その物体のみに着目しては, 力学的エネルギーが一定でない場合をとり上げ, その物体が相互作用をしている他の物体を探し, その物体をも含めた系へ拡張していく。⁸⁾

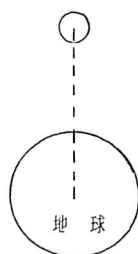
このように, エネルギー保存則が成り立つ条件(系)をつねに明確にしつつ, 系を拡張してゆき, その過程でエネルギー概念の定着を図ることにした。このことを, われわれは指導上の第2のベースとし



た。

このベースに立てば、系をただ一つの物体から多体集合にまで、次々と拡張していく過程が明確で、力学的エネルギー保存則から広義のエネルギー保存則まで、きわめて必然的に到達させることができるものと考えた。

ここで、系という考え方と極めて密接な関係にある場の概念の扱いに言及しなければならいであろう。この点、われわれの間でも若干意見の分かれたところである。たとえば、先に「ただ一つの物体」と述べたが、その背景には既に場の概念が潜んでいる。ここで、それらの議論の詳細を述べる紙面がないが、われわれは導入時における力学的エネルギーの学習には、場の概念は導入しなかった。つまり、「力の背後には他の物体があり」という立場に立っている。たとえば、「地上の物体の位置エネルギーは mgh である」という考え方ではなしに、「物体と地球の位置エネルギーの変化は mgh である」という学習到達目標を設けてある。



(図1)

いずれにせよ、次の段階で場のエネルギーをとり上げなければならないと思うが、このように系のエネルギーを重視するのは、気体分子の内部エネルギー(比熱)などへ発展する際に、それが重要な意味を持つと考えたからである。また、自由度の概念や統計的現象などにおける状態変化の方向性に関するわれわれの考えは、次報にゆずることにする。

Ⅲ 指導計画

1 指導計画の基本路線

(1) 指導計画の特徴

前述のように、われわれは「プログラム化された発見的学習」をめざしている。そのため、事前に生徒の数学的处理能力を調査し、さらに、各小単元に入る前に、その単元に関係したレデネス調査を実施した。その一部については、後の実践の項に記載したが、数学的处理能力は、およそ、低・中・高の3段階にわたる学級である。したがって、以下に述べる指導計画も、ある部分は低クラス向けであったり、また、ある部分は高クラス向けであったりしていることを、あらかじめおことわりしておく。

いずれにせよ、本指導計画の全体的特徴は、次の3つにある。

- ①保存量の概念を運動量の学習で導入した。旧来のように、力積から運動量には入らずに、まず、実験的事実から直接運動量に入った。
- ②エネルギー移動量を測るものさしとしての仕事の意味を前面に出すために、運動エネルギーから入って、位置エネルギーを後にした。
- ③着目する系の拡張については、保存則が成立する条件を検討する学習から始めた。

これら3つの特徴のほかに、使用している教科書(東書物理B)の内容から大幅には逸脱しないよう留意したが、はねかえり係数や仕事率などの学習が除かれていることも付言しておく。

また、すべての小単元の構成が、現象→仮説→測定→理論→理解というステップをふんでいることも

指導の流れの特徴といえるかもしれない。

この「力と運動」の全単元について、われわれは詳細な指導計画をフローチャート形式に立て、実践し、分析を試みたが、紙面の都合で、指導計画の前半は記載を省略し、後半もフローチャート形式を採らずに、骨子のみを記載した。

② 指導計画の概要(力と運動)

I 力のはたらき

II 運動のあらわし方

- (1) 速度 (2) 加速度

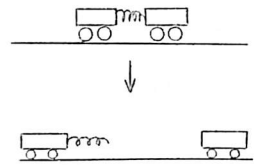
III 力学

- (1)運動状態の変化の原因追究 (2)保存される状態量の追究 (3)エネルギー保存則の拡張

2 指導計画

指導内容	指導の要点	実験・留意点
I 力のはたらき	— 省 略 —	
II 運動のあらわし方	— 省 略 —	
III 力学		
(1) 運動状態の変化の原因追究	— 省 略 —	
(2) 保存される状態量の追究		
① 運動量		○ 実践の項を参照
a 2物体の衝突	<ul style="list-style-type: none"> ○ 運動の法則のみでは解決できない現象として、2台の台車の衝突を呈示する。 ○ 速度が交換されることを気づかせる。 ○ 質量が異なる台車の衝突は速度が交換されないことを気づかせる。 ○ mv が<u>保存</u>されることを実験的に導く。 ○ mv がベクトル量であることを演示実験で確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2台の台車の正面衝突。 ○ 一方を静止させておき、もう一台を衝突させ、速度が交換されることを呈示。 ○ 衝突させる台車の質量を2倍にする。 ○ 2台の台車の速度を記録タイマーで測定し、定量的に考察させる。 ○ 2球の衝突をストロボ写真で解析する。
b 運動量保存則	<ul style="list-style-type: none"> ○ $m\Delta v = F \cdot \Delta t$ を理論的に導く。 ○ $m_1v_1 + m_2v_2$ が保存されることを理論的に導く。 ○ あらためて、2台の台車の衝突実験をみなおす。 ○ 台車の非弾性衝突の実験を演示し、用意したデータを与え、運動量保存則を確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 台車の非弾性衝突について同様の追究をする。 ○ 後述の素材の検討の項を参照
(2) エネルギー		
a 交換保存されるエネルギーの仮定(中学校の復習)		
(i) 爆発の実験		

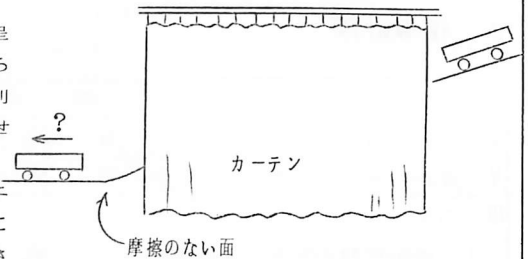
- 運動量の学習の延長として、2台の台車の爆発の実験を呈示する。
- 運動量で説明するなら、全体として0であることを確認する。
- 姿を変えるが保存される量としてのエネルギーを思い出させる。
- 人体的の化学エネルギー
 - ↓…………ばねを圧縮する
 - ばねの弾性エネルギー
 - ↓…………爆発
 - 台車の運動エネルギー
 - ↓…………台車が止まる
 - 熱エネルギー(?)



(図-2) 爆発の実験
○運動量という保存量のほかに、エネルギーという保存される量のあったことに気づかせる。(教師のはたらきかけによる観点の変更)

(II) 複雑な斜面上を滑り落ちる物体の運動

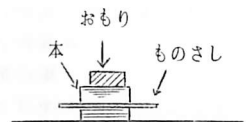
- 途中の経路が不明な斜面上の運動を呈示し、終速度が運動の法則から求められないこと、および、運動量の保存則も手がかりにならないことを確認させる。
- この現象は、位置エネルギーが運動エネルギーに変換している現象であることを気づかせ、定量的な測定法を探させる。



(図-3) 途中の経路不明な斜面上の運動

(III) エネルギーメーターの導入

- エネルギーメーター(くい打ち装置) — 以下EMと記す — を呈示し、前述の実験で運動エネルギーを具体的に測定する方法を討議させる。
- 台車の運動エネルギーは、EMの摩擦によって熱エネルギー※に変換することを確認し、その転換量をはかる目安として、EMのピストンがもぐる量が採用できることを確認する。
- EMのもぐる量が摩擦力によって変わることから、(摩擦力)×(もぐった量)が、エネルギー転換量と関係がありそうだ…………と導く。



(図-4) EM

- 「仕事」と「エネルギー転換量」を同時に導入する。

※「熱エネルギー」の用語については、P を参照のこと。

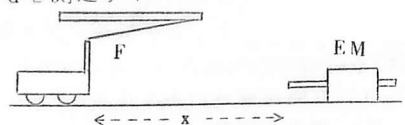
b 仕事

(i) 仕事の定義

- EMのことから、仕事を定義する。(中学校の復習でもある)
- 仕事の単位として、 $[N \cdot m] = [J]$ を約束する。

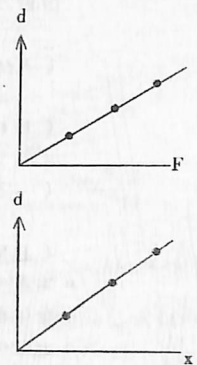
(III) エネルギーメーター(EM)の性格と役割の確認

- 台車に一定の力Fを加え続け、距離xだけ走らせてEMに衝突させる。そのときのEMのもぐる長さdを測定する。
- 台車の質量Mを増す。
そのとき、台車の速度vは遅くなるが、dは前と変わらないことに気づかせる。



(図-5) 台車の E_k 測定

- このことは、前に学習した運動量とどう関係にあるかを問う。
- Mv は F 、 t に関係した量で、 x とは直接関係していなかったことを想起させる。
- あらためて、 F 、 x 、 d の関係を調べよう。
- M 、 x を一定にして、 F を 2、3 倍に変えてみる。結果をグラフにする。
- M 、 F を一定にして x を変えてみる (1 m 以内) 結果をグラフにする。
- (人体内の化学エネルギー)
 - ↓ (Fx で測定できる)
 - (台車の運動エネルギー)
 - ↓ (fd で測定できる)
 - (EMの熱エネルギー)

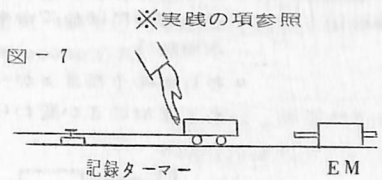


(図-6)

c 運動エネルギー

(i) 台車の速度 v と EM のもぐる長さ d

- 台車を手で押してやり、EMに衝突させる。
- 衝突直前の速度を記録タイマーか、電動ストップウォッチ※で測定する。
- そのときの EM のもぐる長さ d を測定する 図-7
- 次に台車の質量を 2 倍、3 倍に増し、上と同様の実験をする。
- 以上の実験は演示実験とし、あらかじめ用意したデータを $d-v$ のグラフにする。
- グラフが放物線らしいことに気づかせ、それを確認する方法を問う。
- $d-v^2$ のグラフ ($M=1, 2, 3$) を作り、 d が v^2 に比例していることを帰納する。
- $d-v^2$ のグラフで、 M が異なる場合の 3 本の直線に着目させ、 v^2 が一定の場合の d と M の関係をグラフにする。
- d が M に比例していることを帰納する。
- d が台車の運動エネルギー E_k であることを想起させ、 $E_k \propto Mv^2$ を導く。



※実践の項参照

○ 実践の項を参照

(ii) 理論的に $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ を導く

- 質量 m [Kg] の物体に力 F [N] を距離 x [m] だけ加え続けた場合、 $Fx = \frac{1}{2}mv^2$ であることを理論的に導く。
- 台車が EM に衝突する際に、運動エネルギーが熱エネルギーに転換する量が fd で測定できることを再確認し、 $fd = \frac{1}{2}Mv^2$ を理論的に導き、先の実験を再吟味する
- $\frac{1}{2}mv^2$ の単位が J であることを確認する。

○ 物体の運動エネルギーとして転換した量が Fx で測定できることを再確認して、理論へ進む。

d 位置エネルギー

(i) 自由落下

- 中学校の学習を復習し、 $E_p \rightarrow E_k$ の現象に着目させる
- おもりを自由落下させ、EMに衝突させる。(演示)
- この現象を次のようにエネルギーが転換していることを

○ 素材の検討の項を参照

復習させ、各転換量を測定するものさしを問う。

(人体の化学エネルギー)

↓……………持ち上げる。(転換量は Fh で測定できるはず)

(おもりの位置エネルギー)

↓……………自由落下。(転換量は v で記述できるはず)

(// の運動エネルギー)

↓……………EMと衝突。(転換量は d で測定できるはず)

(EMの熱エネルギー)

○ 演示実験に関するデータ ($d-h$ 関係, $d-m$ グラフ) を与える。

○ 上記データをグラフ化する。

○ $d \propto m h$ を実験から帰納する。

○ 理論的に $\Delta E \equiv F h = m g h$ を導く。

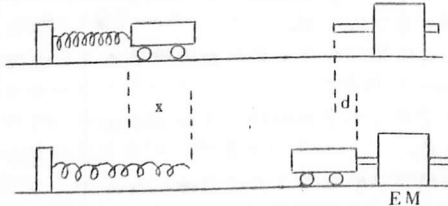
○ $d \propto m h$ を理論的に説明する。※

○ エネルギー転換量が重力 (F) と高さ (h) の面積 (仕事) で表わされることを確認する。

(II) 弾性体の位置エネルギー

○ おし縮めたばねで台車を加速し、EMに衝突させる (演示実験)

○ おし縮める長さ x が一定の場合は、台車の質量を変えても、EMの d が変わらないことを確認する。



(図-8) ばねの位置エネルギー測定

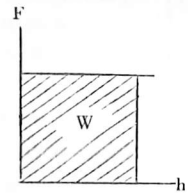
○ この実験の過程で、エネルギーがばねに“貯蔵”され、また“解放”されることを確認する。

○ 用意したデータを生徒に与え、グラフ化の処理をとおして $d \propto x^2$ を導く。

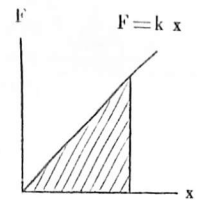
○ フックの法則から ($F-x$ のグラフの面積から)

$$E_p = \frac{1}{2} k x^2 \text{ を導く。}$$

※力学的エネルギー保存則の確認はしない。



(図-9, a)



(図-9, b)

e 力学的エネルギー保存則

(i) 重力場での運動状態

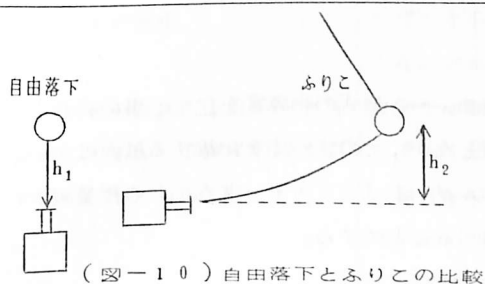
こゝでは次のA, Bの2つの案を作り、A案は能力が低いクラス、B案は能力が高いクラスについて実践した。

(A 案)

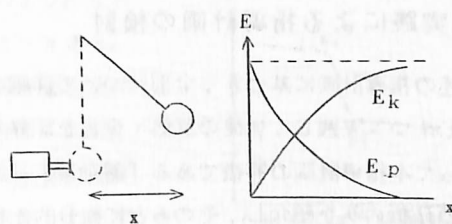
(B 案)

○ 自由落下の現象で $E_p = E_k$ であったことを復習する。

○ 物体が落下する経路が複雑の場合について考える。例として、ふりこをとり上げる。



- 上の実験から、 $h_1 = h_2$ の場合は、EMのdが等しいことを確認する。
- 経路に関係なく $E_p = E_k$ が成立することを確認する。
- $\Delta E_p = \Delta E_k$ が成立する条件を吟味する。

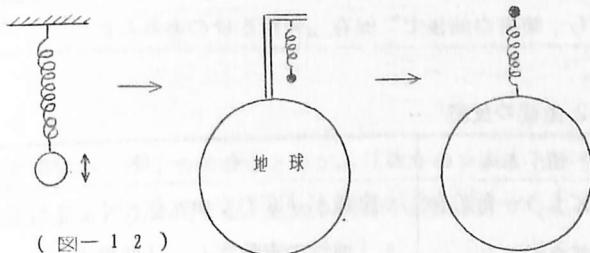


- 自由落下させた物体とEMの衝突から、EMのdとエネルギーの換算グラフを作る。
- 上図の実験で、EMを移動し、ふりこの各位置の E_k を測定しグラフにする。
- ふりこの各位置の E_p を mgh の式から算出し、 E_k のグラフに重ねて記入する。
- $\Delta E_p + \Delta E_k$ が一定になることを確認する。
- ふりこを水中で振らせdを測定し、先の実験結果と異なることに気づかせ、力学的エネルギー保存則が成立する条件を吟味する。

(III) 振動状態をエネルギー的に見る。

- ばねによるふりこをとり上げる。
- 重力場における物体のエネルギー
↓……………(観点の変更)
2 物体という系のもつ位置エネルギー

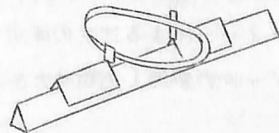
○ ここでは、単ふりこの周期等にはふれない。



- エアトラックを用い、2台の滑走体をばねで連結し、2物体の振動現象を呈示する。
- この系のエネルギーは、最初に、いくら縮めたか(貯蔵したか)によることを確認する。

(3) エネルギー保存則の拡張

- 力学エネルギーが保存されない現象(例、先のふりこの実験、台車の非弾性衝突)をとり上げ、保存則が成立する条件を吟味していく。



—— 以下省略 ——

Ⅳ 実践による指導計画の検討

前述の指導計画に基づき、全部について詳細なフローチャート形式の指導案を立て、事前調査と評価をまじえつゝ実践し、生徒の反応・発言を記録して分析したが、そのすべてを記載する紙面はない。したがって本指導計画の特徴である「運動量」「運動エネルギー」「エネルギー保存則」の授業場面についての分析のみを紹介し、そのあとに総合的な検討を述べることにする。

授業分析の観点

授業の記録および分析に当っては、あらかじめ次の観点を設けた。

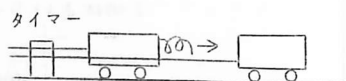
- ①各実験の目的および追究すべき事項を的確に徹底しえたか。
- ②データを処理する課題が適切であったか。
- ③データの解釈および、それから一般化する思考を求める過程(期待)が適切であったか。
- ④採用した実験は教材として適切であったか。

なお、④については、とくに素材の検討として一部を後に述べるが、素材の検討は指導計画の立案と並行して行なったため、素材にやゝ問題点があることを承知で授業に移したものもある。

1. 運動量 — P. 91を参照—

(1) 本時のねらい(3時間)

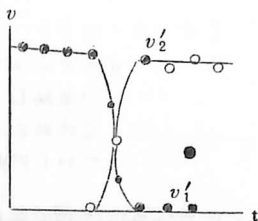
- ① 台車の衝突現象は既習の運動法則だけでは解結できない問題であることに気づかせる。(2体問題であること)
- ② 実験結果から、衝突の前後で“保存”される量のあることを発見させる。



(図-14) 台車の衝突

(2) 授業の流れと生徒の反応

授業の流れ	生徒の反応
1. 静止した台車にもう一台の台車を弾性衝突させる。	<ul style="list-style-type: none"> ○全員が速度の交換に気づく。 ○「慣性の実験だ」、「質量と速さの関係だ」という発言。
2. 非弾性衝突(吸板を使用)	
3. 2体問題であることを確認	<ul style="list-style-type: none"> ○「力がわからないので、運動の法則を適用できない」
4. タイマーによる速度の測定	<ul style="list-style-type: none"> ○全グループがほぼ成功。
5. データの処理(宿題)	<ul style="list-style-type: none"> ○ほとんどの生徒が速度のパラッキを平均化し、直線グラフにまとめた。(図-15, 16) ○「等速運動のはずだから直線グラフにした」



(図-15) 弾性衝突

<p>6. データの解釈</p> <p>7. ストロボ写真によるデータを全員に配布し、それで討論をすすめる。</p> <p>8. 反比例の場合、両者の積が一定であることを想起させる。</p> <p>9. “保存”の考え方を与える。</p> <p>10. 運動量を定義する。</p> <p>11. mv が保存されることを仮定する。</p> <p>12. $2m$ と m の衝突で、運動量保存則を検証する。</p> <p>13. $m \Delta v = F \Delta t$ を理論的に導き力積を定義する。</p>	<div data-bbox="905 280 1163 504"> </div> <p>(図-16) 非弾性衝突</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 図-15, 16 のようにならないグループが2~3あり。 ○ 衝突時間内の過渡現象を気にする生徒1名あり。 ○ 弾性衝突……衝突前後に速度のズレがあるにもかかわらず「速度の交換」を全員が認む。最初の演示実験が印象的であったためか。 ○ “保存”の発言はなし。 ○ 非弾性衝突……「速度が分けられた」「質量と速度は反比例だ」 ○ 全員了解 ○ 一部の生徒には“保存”ということばに抵抗があったようだ。 ○ $mv_1 + 0 = 0 + m_2 v_2'$ を理解した。 ○ 教師が用意したデータを与え討議させた。 <p>以下省略、反省の項を参照</p>
--	---

(3) 反 省

① 保存概念の導入について

等質量の台車の弾性衝突の実験からは、当然のことながら「速度の交換」という見方しかできない一方、非弾性衝突では「速度は質量に反比例する」という発言が多かったが、このことについて、次の2点が指摘できよう。

○ 一般に、「関係は？」と問われると、なんでもかんでも比例か反比例と答える傾向があり、本時もとぶんにその傾向がある。

○ $v_1 + v_2$ についてさえ考えようとする態度がないのは、依然として、衝突を1体問題として考えているせいではないか。

いずれにせよ、ここまでの力学の学習が、個々の物体に目を向けてきたものを、ここで v_1 と v_2 の組み合わせ（系）について考えさせる意義は大きいと考える。

② 力積について

運動量の保存則を実験的に追求していくこの学習の流れで、生徒の中に力積的な思考がほとんどなかったことが印象的である。旧来の指導法が検討されるべきことを示唆していると思われる。

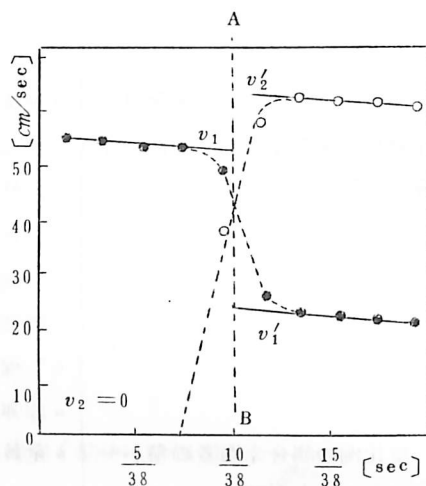
③ データの処理・解釈について

タイマーの記録テープの処理方法は、初めてではないのでスムーズにいった。しかし、グラフの解釈については、単純な衝突の場合、結果に対する予想が先行していて、「思考実験」の様相があり、細部の検討に関する関心が薄かった。しかし、運動量保存則の仮説を立てた後の検証実験(台車の質量比=2:1)で、結果が単純でないため、誤差について気にする生徒が認められた。

④ 素材の検討

衝突前後の速度を求めるには衝突前後のグラフの直線を延長して、衝突が起っている中心時刻線との交点を以って速度とする必要がある。(図-17参照) (図-17) 質量比2:1の弾性衝突

また、非弾性衝突に吸盤を用いたが、実験の操作上、やゝ問題があるようである。吸着させることに失敗する例をしばしば見かけた。



2. 運動エネルギー — P.93を参照 —

(1) 事前調査・事前指導

- この実践は1年生を対象として行なったものであり、3時間のうちの前半2時間分である。
- 1・2学期の2回にわたる「数学的な基礎をしらべるレディネス調査」によれば、数学的な基礎学力は著しくひくい。物理の学習をフォローする数式の変形などに特別の配慮が必要なクラスである。
- 「エネルギー」についての事前調査によれば、エネルギーの移動・保存を仮定するこれからの学習に必要な程度には、「エネルギー移動・転換の具体例をあげる」ことができる。しかし、「エネルギー移動量を量的に求め、その単位を示す」ことや、エネルギー保存則により「位置エネルギーと運動エネルギーの交換を量的にみる」ことへの能力は不十分な状態であった。
- 生徒の実態を考えて、運動エネルギーに入る前の「変換・保存されるエネルギーの仮定」において実際の現象やスライド映写により現象を示し、「状態変化の前後におけるエネルギーの移動」を具体的にいわせる指導を徹底した。さらに「仕事」において、エネルギー・メーター(以下E.M.と略す)の性格を生徒実験で追究させ、「エネルギー移動量」がE.M.のスケールのもぐった長さd(摩擦力 $f \times d$)で測定できることを指導した。

(2) 授業のねらい

力学台車とE.M.の衝突現象を見せ、台車の運動状態の変化により、台車からE.M.に移動したエネルギー(E_k)を実験的に求め、さらに既知の力学法則からの説明を考えさせ、一般化をはかる。

- 台車とE.M.の衝突の実験データを処理することにより、 $E_k \propto mv^2$ を導く。
- $f d$ を手がかりにして、 $E_k = \frac{1}{2} mv^2$ を理論的に導く。

（③データから E_k [J] を求め、摩擦係数 f [N] を求める……3時間目）

（3）授業の流れと生徒の反応

授 業 の 流 れ

生 徒 の 反 応

台車がEMに衝突する直前の運動状態 (E_k) は速度と、どういう関係にあるかしらべていこう。

台車を手でつきはなし、EMに衝突させる（演示）

1. 台車の E_k は何によって測定できるか。
2. 台車の v は何によって測定できるか。

準備しておいた記録テープのプリントと、そのときの d の値を配布。

配布したものと同じものをOHPで投影

1. 記録テープ上の衝突点はどれか。
2. 衝突直前の速度を求めよ。

（板書）

No.	5打の長さ [cm]	Δt [S]	v [cm/S]	d [cm]	$E (= f d)$ [Kg·m]

1. 測定結果をグラフ化せよ。
2. $d-v$ の関係は？

（図-19）

3. $d-v^2$ グラフにすることをのヒントを与える。

○ 図-7を参照

○ 実験の意図はかなり徹底していた。

$E_k \cdots \cdots EM$ の d } この対応はよく理
 $v \cdots \cdots$ タイマーの打点 } 解していた。

（図-18）

- 与えられた d の数値から逆に推定することを教師のヒントで知る。
- 衝突直前の打点間隔だけでなく、それ以前の打点間隔をも測定している生徒あり。

○ 測定から作表まで15分。

○ 全員が測定点を曲線で結んだ。

○ 「放物線だ」の発言あり。

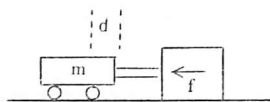
○ 「 v と d は比例だ」という発言があつて、それに対する反論なし。（増加関数であれば、すべて“比例”と表現する傾向あり。）

○ 「放物線」という発言があつても、横軸を v^2 に座標変換する発言は全くなし。

生徒が作成した $d-v^2$ をグラフをOHP投影

1. 直線化できたか。
2. d と v の関係は。
3. 3 kg で実験した場合の結果の推定は。
4. d と m の関係は。
5. d と m , v の関係は。
6. E_k と $m \cdot v$ の関係は。

EMに着目し, $f d$ を手がかりに, 理論的に E_k を v で表現しよう。(問題場面をOHP投影)



(図-20)

- 折れ線グラフの生徒あり
- 「 d は v^2 に比例する」発言が一部にあり。
- 正しい推論をした。
- しかし「 d は m に比例する」という発言なし
- $d \propto m$, $d \propto v^2$ から $d \propto m v^2$ はスムーズに理解した。

◦ $-f = ma$, $a = \frac{0-v}{\Delta t}$ はどうにか誘導できた。

◦ しかし, $d = \frac{v+0}{2} \cdot \Delta t$ は, ついに引き出せなかった。

◦ 結局 $f d = \frac{1}{2} m v^2$ の理論的導出は, 生徒にとって手品?に終わったように思われる。

(4) 反省と評価

① 指導計画の全体的な流れについて

本時の授業の流れは④台車の速度と運動エネルギーの関係を実験的に求めること, ⑤その関係を理論的に追究することの2つにあるが, そのことを, 生徒はよく理解していた。そして, このクラスのように, 数学的能力の低い生徒には, とくに④の実験による指導が中心となるべきことを痛感した。

② データの処理・解釈について

◦ タイマーとして $1/50$ 秒交流タイマーを用い, 5 打点 ($1/10$ 秒) 間隔を測定させた。そのため, 速度の算出は容易にできた。交流タイマーの優れた点ではないだろうか。

◦ 台車がEMに衝突する直前の速度を求めるのに, 前述の図-17のような方法をとるのがより精密な方法と考えられるが, この場面の実験では, その必要はないと判断したい。

◦ $d-v^2$ のグラフ化において, 折れ線グラフにすることを固執した生徒があった。その考えの背景には「測定の際には $1/10$ 目盛まで読め。しかし, グラフにするときは大胆に傾向を見る線を引け」という指導に反発していることにあるらしい。

③ 「エネルギー・移動量をはかるものさし——仕事——」の思考について

われわれの指導のベースである「 $\Delta E_k \rightarrow$ 熱エネルギーを $f d$ で測る」ことは, かなり徹底していたと思われるが, E_k を v で理論的表現することができなかったことは, 数学的な処理能力の不足だけではなかったかもしれないという反省もしている。

(5) 実験方法の検討

① 台車の速度の測定法

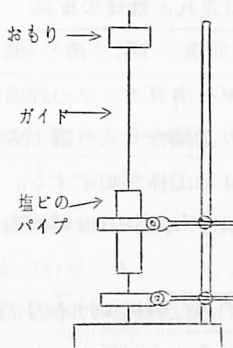
衝突直前の台車の速度は, 前述の記録タイマーによる方法のほか, 別のクラスでは, 電動タイマ

ーを使用した。後述のP.104を参照されたい。

(2) 簡易エネルギーメーター

エネルギーメーターとして、授業では2種類のものを使用した。一つは、前述の図-4に示したもので、本を2冊重ねて、その間に30cmものさしをはさみ2kgのおもりをのせたものである。後述の図-22もこの種のものである。この装置は垂直に使用できないのが欠点である。

もう一つは、垂直用のもので、直径2cmの塩ビパイプを鉄製スタンドにはさみ、それをピストンにしたものである。落下させるおもりのガイドとして、鉄棒を通してある(図-21)



(図-21)

両者の欠点として、ともに再現性があまりよくないことにある。再現性をもっと確かなら、ピストンにJ単位か、 $\text{kg} \cdot \text{m}$ 単位のめもりをつけることができよう。また、筆者の一人は、中学校理科で、水平・垂直両用のEMを工夫し、終始、その装置を用いて通す指導の経験があるが⁸⁾、そのほうがEMに関しては一貫性があってよいようである。今回、その方法をとらなかったのは、準備の都合と、「自然現象にはEMになっている現象が多い」ことを理解させたいという願いもあったからである。

3. 力学的エネルギー保存則 — P.95を参照 —

(1) 事前調査

生徒に対して右のような問題をいくつか課して調べたところ、正答率は約90%であった。この結果、力学的エネルギー保存則については、ほぼ全員がその内容を知っているという立場に立って授業を行なうこととした。

なお、この授業で一貫してとってきた、エネルギー移動量を仕事ではかるということについては、この時間以前に仕事、運動エネルギーおよび位置エネルギーの項で合計4時間、実際にデータ処理を通じて指導してある。

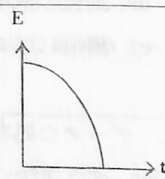
(2) 授業のねらい(指導計画B案)

- ぶりの運動をエネルギー的に考察し、運動エネルギーと位置エネルギーの測定の仕方を確かめる。
- データ処理を通じて、力学的エネルギー保存則を推則させる。
- 力学的エネルギー保存則が成り立つ条件をさぐり、

力学的エネルギー保存則は条件付きの保存則であることを認識させる。また、このことを通じて、より広い意味でのエネルギー保存則を得るにはどうすればよいかを推則させる。

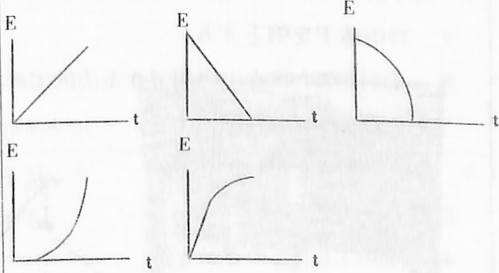
- 力学的エネルギー保存則を実験的に検証すると同時に、その使い方を示唆する。

物体が垂直に落下するとき、物体の位置エネルギーと時間の関係は右図のようになる。



(図a)

このとき、物体の運動エネルギーと時間の関係を示すグラフは、どんなグラフになるか。下から選べ。



(図b)

(3) 授業の流れと生徒の反応

指導の流れ	生徒の反応
1. エネルギー換算グラフの作成 a おもりを高さ h より落下させ EM に衝突させる。 b $h-d$ の関係を測定する。(データを与える) c $E = mgh$ より h を E に換算し、 $E-d$ グラフを作る。	<ul style="list-style-type: none"> 作業の意味はよく理解していたが、その目的についての理解が、やや不十分であった。 この実験は、「EMの性格しらべ」の復習でもある。 $E-d$ の比例・換算可能を確認した。
2. ふりこの各位置における力学的エネルギーの測定 a ふりこを放す位置を一定にして、各位置の運動エネルギーの測定法を問う。 b EM を支持台に固定し、先の実験に用いたおもりをふりことしてセットする。(図-22, 23を参照) c この装置で、各位置の位置エネルギーと運動エネルギーが測定できることを確認する。 d 衝突の演示をする。 e 測定しておいたデータを全生徒に配布する。	<div data-bbox="760 598 1067 890" data-label="Image"> </div> <p>(図-22)</p> <ul style="list-style-type: none"> この段階で、先の EM 特性を調べた意図を理解したものがあった。 「エネルギーは本当に損失なしに転換し、d に現われるのか。そうでなければ、この実験の意味がない」という発言あり。
3. データの処理 ($x-E$ のグラフの作成)・解釈 a グラフ化 b グラフの検討 c $E_k + E_p$ をグラフ上に作る。(図-11)	<ul style="list-style-type: none"> 測定点のバラツキを適切に処理した。 $E_k + E_p = \text{一定}$ という予想は、ほとんどの生徒がもっていた。 「多少のちがいは測定誤差だ」という発言。
4. 力学的エネルギー保存則を理論的に導く。 a 自由落下を例とする。 b 「ふりこ」にも、適用できる法則であることを先の実験事実から推測する。	<ul style="list-style-type: none"> ほぼ全員が理論的導出を理解した。 「ふりこの各位置の速度を測定してみたい」という発言あり。
5. 力学的エネルギー保存則の応用 a 右図のふりこの運動を推測させる。 b 事実の確認	<ul style="list-style-type: none"> 予想に自信がもてなかった生徒も、かなり見受けられた。 中学校理科で学習済みであると予想していたが、この事実に対して、多くの生徒が驚きを示した。
6. 力学的エネルギー保存則が成立する条件の追究 a ふりこを途中で水の中にくぐらせた場合、上が	<ul style="list-style-type: none"> 上がる高さが小さくなることを全生徒が予想

る高さを予想させる。 b 演示 c 理由を問う d 成立条件を確認する	した。 ◦「成立条件は孤立系だ」という発言があって 参観者を驚かす。 ◦「水はお湯になる」という発言。
7. 力学的エネルギー保存則の検証 a 途面で台車を走らせるときの、最終速度を問う b 理論的に算出させる。 c 実験により検証する。（図-24を参照）	◦理論的に速さを求めるとき、平方根の開平が できない生徒がめだった。 ◦摩擦の影響を指摘する生徒あり。

(4) 反省

① 指導計画の流れについて

この実践は、指導計画のB案によるものであるが、このクラスのように学力がかなり高いクラスに対しては、実験 → 理論という指導の流れではなしに、理論 → 実験 → 理論、というパターンを適用してもよいように思われた。

すなわち、ここまでの学習の底流には、エネルギーの保存概念があったのだから、まず、自由落下というきわめて単純で条件が整った現象について理論的に保存されることを導き、次にそれを仮説として、条件が複雑なふりこについて、実験的に検証し、力学的エネルギー保存則を確立する方法がある。

また、水中ふりこの実験で、力学的エネルギー保存則の成立条件を問題にしたとき、すでに、熱エネルギーまでを含めれば、広義のエネルギー保存則が成り立つことを思考していた生徒のあったことは、これからの指導計画に、有力な手がかりがつかめたと思われる。

② データの処理・解釈について

このクラスの場合も、思考実験と実験事実とが混乱している傾向がみられた。すなわち、データを処理してグラフ化する段階で、予想が先行して、測定結果のバラツキや誤差に対する関心がきわめて薄い。理くつが優先して事実が後になったり、「精密な実験によれば……」という態度を助長させない配慮が必要であると痛感した。

③ 指導計画A案について

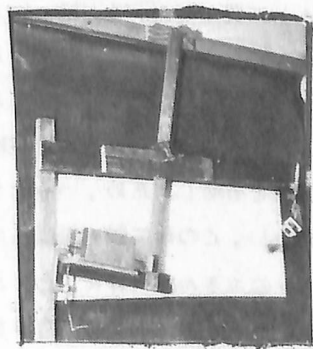
A案による実践は、B案のクラスに比較し、かなり学力のおとるクラスで行なったが、生徒はわれわれの予想どおりの反応を示し、ほとんどの目的は達成できた。紙面の都合で詳細は省略するが、B案のほうが、短時間ですむというメリットがあるようである。

(5) 素材の検討

(a) ふりこの力学的エネルギーを測定する実験

この装置は、ふりこを一定の位置から放してやり、任意の位置における運動エネルギーを測定するものである。

ふりこのおもりは鉄球であって、電磁石によりセットできる。（図-23）ふりこのエネルギー



また、EMは、ふりこと同じ半径で回転させ固定できるようにしてある。

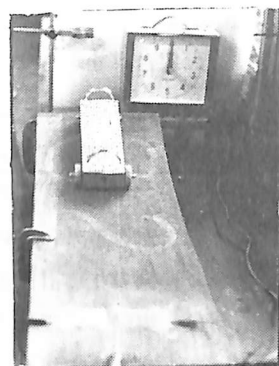
EMのめもりdを読めば、d-E換算グラフから、たゞちに運動エネルギーが求められる。図-11に示したような、 $E_p + E_k$ が一定となる結論を導くのに必要な結果を示してくれる。

しかし、この実験は、B案の指導計画のように、生徒実験として課することができない欠点がある。

(b) 斜面を走る台車の速度

この実験は、斜面を走り下りる台車の速度を測定し、エネルギー保存則から推定した値と比較する「力学的エネルギー保存則の検証実験」である。

装置は簡単で、図-24のように、アルミ箔を台車の車輪が踏んでいる時間を電動タイマーで測定するものである。精度を上げるためには、アルミ箔の幅をある程度広くし、タイマーの計測時間が0.1秒以上になるよう留意すればよい。



なお、この装置は、運動エネルギーを導入するときにも使用した。(図-24)斜面を走る台車

4 総括的反省

この指導計画を実践してみて、総括的に次のように反省している。

- ① 先に述べた2つの指導ベースで一応通すことができた。
- ② “プログラム化された発見的学習”の流れは、ほぼ満足のいけるものであったが、そこで、とり上げる実験が思考実験の具現化に終らぬよう警戒しなければならない。
- ③ エネルギーメーターを一貫して使用する指導の流れは、一応成功していると思われるが、特性の優れたエネルギーメーターの開発が望まれる。

V おわりに

この研究で共同討議をした日数は、そう多くはない。しかも、その大半を「エネルギーをどうとらえるか」に費やした。それは、エネルギー概念が自然科学の全領域にかかわる最も基本的な概念であるにもかかわらず、そのことに関するわれわれの認識が、あまりにも不足していたためであった。また、今回の研究分野は力学分野に限ってあるが、その先の展望をも、もつためでもあった。

したがって、この報告は実践研究報告として形をなしていない面がある。紙面の都合で、評価に関する記載を省略したため、いっそうその感が深いと思う。

しかし、この後に続く振動系の内部エネルギー、波動・場のエネルギー、エントロピー的思考、原子レベルのエネルギー等々、われわれなりの構想に基づく指導計画に対して、このスタートの時期に読者諸氏から厳しいご批判、ご指導をいただきたいと考え、拙文にまとめた次第である。ご批判をいただきたい。

おわりに、この研究を進めるに当り、いろいろとご高配くださった所属校校長先生はじめ、献身的にご協力くださった理科部の先生方、また、授業分析の折に近郷から参加してくださった先生方に深甚なる敬意と謝意を表します。

VI 文 献

- 1) PSSC: Teacher's Resource Book and Guide, HEATH (1961) Part3, P.24-2
- 2) 富山小太郎: 中等教育構座理科編, 文部省(1961) PP.39-50
- 3) Nuffield Physics, Teacher's Guide I, Longmans (1967) P.24, 264
- 4) 富山小太郎: 現代物理学の論理, 岩波書店(1956) PP.51-66
- 5) ボアンカレ: 科学と仮説, 岩波書店(1959) PP.151-157
- 6) 唐木宏: 物理教育15 (1967) PP.210-211
- 7) 小島昭次郎: 物理教育14 (1966) P.60
- 8) 茅誠司ほか訳: PSNS 教養の物理科学, 東京化学同人(1967) P.33
- 9) 駒野庄平ほか: 新潟県立教育センター実践研究集録第8集理科(中・高)編(1971) P.1
- 10) 近角聡信ほか: 物理B指導資料第2編, 東京書籍(1972) P.149
- 11) 山田盛夫: 物理教育18 (1970) PP.39-45